中華農業研究 (Jour. Agric. Res. China) 49(4): 16～28 (2000)

# DSSAT模式在預測水稻產量及氣候變遷衝擊評估之適用性探討[1]

姚銘輝[2]　盧虎生[3]　朱　鈞[3]　蔡金川[2]

**摘要**：對農業生產而言，氣候具有二種意義，若能有效管理則爲一種資源，相反的，則是一種危害。大氣二氧化碳濃度在過去200年來，由280ppm增加到350ppm，最近35年和其他溫室氣體快速增加，由315ppm迅速增加到350ppm。增加的二氧化碳濃度經由直接刺激光合作用進行而影響作物生長，這種生理反應一般稱爲“二氧化碳肥料效應”，在其他條件配合下可使作物生育更好及更有活力，進而提高乾物重產量。此外，提高二氧化碳也可透過對氣候因子（例如溫度及降水）的影響，間接影響作物生長。水稻是台灣地區最主要農作物，探討未來氣候變遷對水稻生產相當重要。本研究利用DSSAT生長模式並和大氣環流模式相結合，同時由氣象因子的敏感度分析瞭解對產量的影響，結果顯示提高二氧化碳濃度有助於水稻增產，但提高溫度則相反。而由DSSAT模式預測台中地區水稻產量，在二倍現行二氧化碳濃度下， GISS模式預測爲增產2.5 %，GFDL爲4.2 %，UKMO爲4.0 %。

**關鍵詞**：氣候變遷、溫室效應、二氧化碳肥料效應、大氣環流模式。

## 前　言

大氣中$CO_2$濃度自1958年開始觀測起即呈現穩定增加趨勢，1995年爲358 μmol，至2075年將達到670～760 μmol [28]。由於$CO_2$及其他溫室氣體增加的結果，許多氣候及大氣環流模式(General circulation model；GCM)預測全球地表氣溫將明顯昇高[17, 10]。溫度昇高也將使地表蒸發散增加，加速水文循環。預估二倍$CO_2$濃度(560 μmol)時全球溫度將會升高2.8～5.3℃，而降水量增加6.7～13.5%[14]，另由於水汽蒸發影響雲的生成，也間接影響太陽輻射量。因此，氣候將全面改變，無法僅以$CO_2$濃度及溫度的昇高來思考或評估未來氣候變遷對農作物生長或產量的影響。

由作物生理學的觀點，提高大氣$CO_2$濃度則進入氣孔內腔$CO_2$的通量相對增加，而增加葉片光合作用速率[33]；另外一方面，當$CO_2$含量昇高將減少$O_2$和Rubisco (Ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase)結合。以C3型植物(大多數農藝作物屬之)而言，將減少耗費能量之光呼吸(photorespiration)，使生質量(biomass)累積，進而提高作物產量[9]。

水稻生育範圍極廣，由北緯45°至南緯40°皆有，在2500公尺高山也有種植。低溫是限制水稻種植區域向溫帶及高山寒冷地區發展的主因[23]，未來全球暖化將有利於水稻在這些區域的種植。在一些

---

1. 行政院農業委員會農業試驗所研究報告第2041號。

2. 本所農業工程系助理研究員、副研究員。台灣省　台中縣　霧峰鄉。
3. 國立台灣大學農藝系教授。台北市。

溫度對水稻生育影響的研究中，營養生長期間水田水溫由18℃到33℃間，生質量隨溫度昇高而增加[19]，但在水稻生殖生長期間提高溫度對產量則有負面影響[38]，主要是穀粒充實日數縮短，每穗未充實粒數增加[6]，同時過高溫度若配合低濕度等則容易導致水稻稔實率嚴重下降[18]。

依據試驗室內或以FACE方式皆可證明提高$CO_2$可助於光合作用及乾物重累積[7, 35]，但$CO_2$提高的同時也使氣溫增加。Jansen(1990)利用MACROS作物模式探討東亞地區氣候變遷下水稻生產情形，其結果指出溫度略為增高有助於產量增加，但如果超過0.8℃則產量開始減少，減產最大幅度發生在北緯10-35°之間。Rosenzweig *et al.* (1993)以IBSNAT模擬22個國家作物生產情形，其中包括水稻，結果發現低緯度農作物生產區在氣候變遷下將減產；但中高緯度則呈增產現象，作者認為中高緯度經暖化後，作物生育時間延長，加上$CO_2$肥料效應使乾物重累積增加而增產；低緯度的增溫則生育日數縮短，造成穀粒充實不足而減產。

目前對於氣候變遷影響農作物產量及耕作制度改進的評估，大多先發展作物生長模式，再將氣候因子由大氣環流模式依預測地區的經緯度，判別其氣候輸出值，再由輸出值帶入生長模式中進行評估。DSSAT(Decision support system for agrotechnology transfer)是由美國夏威夷大學支持開發之作物生長模式，並且由全球各大學及研究機構之專家學者共同參與各種作物之模式開發。DSSAT模式預測結果已被政府間氣候變遷委員會(Intergovernmental panel on climate change, IPCC，為聯合國下之研究組織，所發表氣候變遷報告，具有公信力)所接受。

在氣候變遷的前提下，已經有相當多研究文獻探討對農作物生產的影響[15, 34, 26]。在水稻的研究中，Yoshino *et al.* (1988)利用GCM模式中之GISS預測日本水稻在2倍$CO_2$時將增產9%。Soloman and Leemans(1990)利用簡易作物模式研究全球水稻將增產0.4%。美國加州水稻在兩倍$CO_2$時產量反而減少11～21%[32]。Matthews *et al.* (1997)利用兩種水稻生育模式ORYZA 1及SIMRIW探討GCM模式預測亞洲水稻生產情形，結果顯示將減產3.8%，其中減產區域為泰國、孟加拉、中國南部及印度西部，有些區域則增產，包括印尼、馬來西亞及台灣等地區。不過該研究所用品種為Ishikawi，基準產量為2798公斤,和現行我國常用品種及實際產量並不相同。

我國地處亞熱帶，氣候條件適合水稻種植，同時水稻也是最大宗農作物，水稻產量多寡影響農民生計及糧食安全，在未來氣候變遷下對我國水稻生產的影響是值得探討的課題。本研究擬以台中地區水稻生育調查資料測試DSSAT在當地之預測能力，並進行氣候敏感度分析，以了解不同氣候情景（scenario）對產量影響程度。並由GCM模式取得接近我國之網格交叉點上的預測值，再經DSSAT預測二倍$CO_2$時之氣候狀態對我國水稻產量的衝擊評估。

## 材料與方法

### 一、資料來源：

水稻生育資料取自於農業試驗所(東經120°，北緯24°，海拔高度85公尺)進行之水稻豐歉試驗，自民國81年第一期作至88年第二期作止，計八年，十六期作，參試品種為稉稻台農67號及秈稻台中秈10號二品種，氣象資料則由該所農業一級氣象站之每日氣象資料為資料庫。生育資料是由插秧後三週開始調查，包括每週調查葉乾重、桿乾重、穗重、葉面積，並於成熟期調查產量及產量構成要素。由於試驗目的在探討氣象和產量間的關係，因此水稻試區是在固定田區，並由專人負責作一致的管理，並適度控制病蟲害發生，盡量排除非氣象的影響因子。

### 二、DSSAT模式基本資料

DSSAT氣象資料輸入值為每日之太陽輻射量、最高溫度、最低溫度及降雨量，這四項資料在一般氣象站皆可提供。水稻栽培方式設定是依據目前慣行方式進行，例如行距30公分，單位面積株數為22株/平方公尺，模擬以單一期作為主，不考慮前期作的影響。土壤特性則以選項式提供使用者選擇最接

近模擬地區之土壤特性，DSSAT共有41種不同類型之土壤，也可由使用者依據資料自行建檔，本研究是依據農業試驗所農場之土壤特性調查資料，選取粘質壤土(選項編號27)為水稻田土壤質地，施用氮肥量為113kg $ha^{-1}$，模擬過程中則設定為無肥料逆境，其餘有關土壤特性則依據模式內預設值進行模擬。DSSAT模式中每一種作物皆有可供選擇之遺傳特性，例如水稻有34種秈粳稻品種，而一些本土性選育之品種可藉由內部計算程序(GenCalc)得到該品種之遺傳參數，本研究除利用內部運算遺傳參數外，並選取已有遺傳參數之種原種植於農試所農場及溫室內，由不同溫度變域觀察開花及成熟日數，再由模式內部運算與實際種植觀測結果相互比較，以確定本土品種(台農67號及台中秈10號)之遺傳參數。至於對氣候變遷的評估有二種方式，由現有資料經WeatherMan產生另一組氣象資料，經計算統計後代入模式內進行評估，或是由敏感度分析將現有資料以加減某一數值，或乘以某比例方式進行。分析之氣象因素除四項輸入值外，尙包括日照長度、$CO_2$濃度、濕度及風速，而$CO_2$濃度調整時也考慮其他氣象因素之交感反應。

### 三、模式參數測定及敏感度分析

敏感度分析是將某一參數提高或降低輸入值，並在其他參數固定情形下，檢測輸入值對模式輸出值的影響程度，可透過參數的調整而瞭解對產量的貢獻度。由於DSSAT為綜合性模式所需參數甚多，包括耕地土壤特性(質地、酸鹼度、離子含量及有機質含量等)，作物特性(遺傳特性及生理特性)，氣象資料則為氣溫、日射量及降雨量三種。本研究主要著重於氣象因子之敏感度分析，用以瞭解對作物模式所預測之產量的貢獻度，溫度及$CO_2$濃度以固定數值方式進行，即增減某一數值而進行敏感度分析，雨量及日照強度由於變異係數較大，因此以固定倍數方式進行。至於其他參數若有實測值則輸入模式內，若無實測資料則以推估方式進行。

### 四、GCM模式對氣候變遷之預測

目前有多種氣候模式的建立，模式的基本特性是將全球以立體結構加以網格（mesh）化，由近地層到高空的垂直剖面分成九層，每一網格所含蓋的面積為4.5°（緯度）×7.5°（經度），全球共1920個網格。當然每一模式因不同研究主題而有所差異，表一為目前進行氣候變遷衝擊評估最常用三種模式的特性，GFDL (Geophysical fluid dynamics laboratory) [36]、GISS (Goddard institute for space studies) [10]及UKMO (United Kingdom meteorological office) [37]。本研究將上述三種模式之輸出值分成一期作（3,4,5,6月）、二期作（8,9,10,11月）及全年等三種。溫度以增減某一數值，光照強度及雨量則以倍數方式表示。

**表1.** 本研究所使用之大氣環流模式特性

**Table 1.** Major feature of the three general circulation models used in this study

| | General circulation model | | |
|---|---|---|---|
| | GFDL | GISS | UKMO |
| Source laboratory | Geophysical fluid dynamics laboratory | Goddard institute for space studies | United kingdom meteorological office |
| Reference | Wetherald & Manabe (1988) | Hansen *et al.* (1988) | Wilson & Mitchell (1987) |
| Horizontal resolution(lat. x long) | 4.4° x 7.5° | 7.8° x 10.0° | 5.0° x 7.5° |
| Vertical resolution (no. of layers) | 9 | 9 | 11 |
| Diurnal cycle | no | yes | yes |
| Base 1 x $CO_2$ (ppm) | 300 | 300 | 323 |

## 結果與討論

由於每一水稻品種的生育時期轉換或是對環境的敏感度並不相同，因此建立水稻栽培品種的遺傳

係數是DSSAT模式建立的基礎。我國水稻育種或是水稻種源引進的調查較爲粗略，DSSAT所需之遺傳參數(如光周期性、分蘗係數或溫度忍受係數)常缺少，因此無法由種源資料瞭解本地水稻品種的特性。本研究對於遺傳參數的判定採用二種方式，一種是由模式內部運算，另一種是以實際種植觀測方式進行。DSSAT提供不同品種遺傳參數計算的功能[11]，因此將我國主要水稻栽培品種台農67號及台中秈10號，在農業試驗所調查資料輸入模式內計算。另以實際種植由DSSAT水稻模式所提供34個秈稉稻品種中選取其中7個品種(IR8、IR20、IR36、IR64、IR72、CICA8、Lemont)，分別於87年二期作及88年一期作種植在田間，另以盆栽方式種植水稻於塑膠布溫室內，以增加品種在不同溫度環境下的表現。由田間及溫室調查不同品種之開花日數及成熟日數，並配合栽培環境氣象資料，將此兩項資料輸入模式內計算遺傳參數。由DSSAT所提供之遺傳參數與該品種在本地的觀測值作出檢量線，如此才可確認模式所計算之台農67號及台中秈10號遺傳參數的正確性，經計算及校正後之數值列於表2。

表2. DSSAT模式所用之水稻遺傳參數

**Table 2.** The genetic coefficients of rice used for DSSAT model

| Genetic coefficient (abbreviation)[z] | Value | |
|---|---|---|
| | Tainung 67 | Taichung sen 10 |
| Juvenile phase coef. (P1), GDD | 520 | 500 |
| Critical photoperiod (P20), h | 11.7 | 12.0 |
| Photoperiodism coef. ($P_2R$), GDDH$^{-1}$ | 100 | 90 |
| Grain filling duration coef. (P5); GDD | 450 | 350 |
| Spikelet number coef. (G1) | 75 | 70 |
| Single grain weight (G2), g | 0.024 | 0.026 |
| Tillering coef. (G3) | 1.00 | 1.00 |
| Temperature tolerance coef. (G4) | 1.00 | 1.00 |

[z] GDD, growing degree days (℃)

DSSAT預測水稻每一生育階段所需日數，包括幼苗終期、始穗期、抽穗期、穀粒充實期及成熟期等時期。所預測每一階段之生育日數是依據積算溫度(growth degree day, GDD)決定。一般是以平均氣溫扣減某一基準溫度(水稻基準溫度爲9℃)後加以累計溫度值。圖1爲1992(1999年水稻台農67號田間調查成熟期及DSSAT模擬值的相關性，一期作決定係數($R^2$)達0.92，二期作偏低爲0.86。大致上DSSAT在生育時期的判斷和實際田間調查結果是相近的。

爲了瞭解DSSAT對我國水稻產量的預測能力，將1992-1999年氣象資料輸入模式中以預測水稻產量，圖2爲台農67號及台中秈10號在一、二期作預測的結果，稉稻預測能力較佳，$R^2$值在0.7以上，秈稻則稍低，一期作0.64，二期作0.68，其中1994年二期作由於白葉枯病大流行而減產，在本研究並未進行病蟲害模擬，因此將此期作資料剔除。

產量預測能力受許多因素影響，因此發展出許多種預測方式，針對預測方法的利弊，生長模式研究大師Monteith (1981)曾經說過"對於作物、氣候之間的研究，利用統計方式是相當笨拙的方法，因爲它忽略物理和生理機制間的相關性"。早期一些生長模式是以統計(如複迴歸)將過去試驗數據加以歸納而得，由於資料來源及模式預測是相同地區，預測能力準確性較高。孔(1989)曾指出美國利用複迴歸模式預測農作物產量，預測能力相當好，所預測產量與實際產量誤差僅在5%之間，但在氣象異常年代則誤差達20-30％。顯然利用統計模式在資料範圍內加以內插尚可利用，但不足以進行外插預測。之後發展之模式強調在機制性(mechanism)（DSSAT屬之），根據作物生理和物理定律訂定生長因子間的關係性。這種模式具有攜帶性及普遍性，也就是在不同地域環境皆有穩定準確的預測結果，同時對於極端氣候也有較佳的預測能力，特別是針對氣候變遷等議題，不過對於單一區域預測力和統計方式

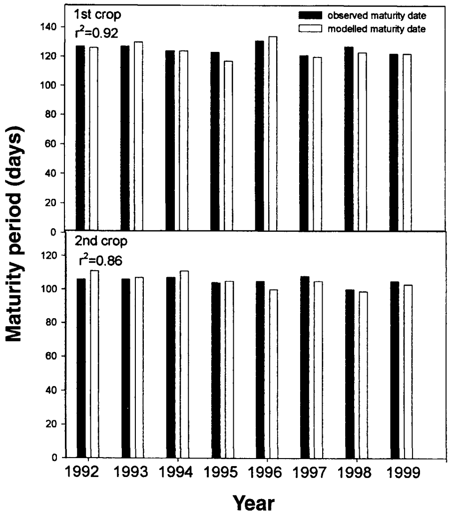



圖1. 1992至1999年間農業試驗所農場水稻成熟日數實測值與模擬值之相關性。

**Fig. 1** The relationship between modelled and observed maturity period for rice during 1992-1999 growing seasons at Taiwan Agricultural Research Institute field sites.

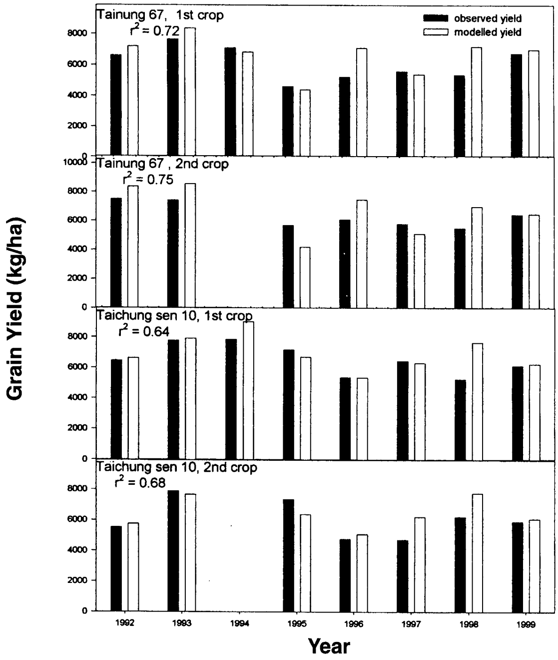



圖2. 1992至1999年間農業試驗所農場水稻穀粒產量實測值與模擬值之相關性。

**Fig. 2** The relationship between modelled and observed grain yield for rice grown during 1992-1999 growing seasons at Taiwan Agricultural Research Institute field sites.

相較則偏低。就產量預測度而言，DSSAT對台中地區水稻產量的預測能力，決定係數($R^2$)約在0.6-0.7之間。預測能力隨歷史資料時間越長或區域範圍越大則準確度越低，Chipanshi *et al.* (1999)利用CERES模式和30年小麥產量歷史資料相較，決定係數($R^2$)僅約0.5。雖然主要參數(如光照或溫度)和產量間已有關係式可穩定預測，但土壤一作物一大氣間是相當複雜，針對機制性模式並沒有足夠的測定值可輸入模式中，因此有些參數必須以預設值作爲輸入值，而模式本身對於生長逆境的解釋度不足，也容易造成產量預測值和實測值有差異的原因。同時作物本身之"生物性"，每一生理反應皆由幾百或幾千個酵素或代謝途徑所控制，由於作物生理反應的非線性特性及物種(或品種)遺傳調控的複雜性，雖然目前利用分子生物技術對於生理或產量的形成作廣泛探討，但仍然無法模式化，這些因素都是造成機制性模式預測偏低的原因。

年度或期作間水稻產量隨當時氣象條件而異，每一生育時期的氣象因子變動幅度影響最終產量的形成。表三爲1992(1999年農業試驗所農場水稻一、二期作生育期間之氣象資料，統計項目爲平均最高溫、平均最低溫、太陽輻射量及降雨量等四項，這四項同時也是DSSAT氣象輸入值。由表中資料，在8年期間內不同年份的平均最高溫及最低溫差值在2.2～2.5℃之間，一、二期作皆有相同結果。最低及最高溫度的變異係數(coefficient of variation, CV)爲3～8間，二期作通常較一期作高；累積太陽輻射量一期作爲6，二期作爲13；累積雨量則變化極大，一期作CV值41.4，二期作156.4。1995年二期作降雨爲62公厘，1992則高達697公厘，相差約10倍；一期作在多雨及少雨年度之累積雨量也相差5倍以上。

**表3.** 農業試驗所農場1992-1999年間水稻生育期間之最高及最低氣溫、太陽輻射量及降雨量之平均值與變異係數

**Table 3.** Mean and coefficient variation of maximum and minimum temperature, solar radiation and precipitation during the rice-growing season of 1992-1999 at Taiwan Agricultural Research Institute field sites

| Year | Mean Max. Temp.(℃) | | Mean Min. Temp.(℃) | | Solar Radiation(MJ/m$^2$) | | Precipitation(mm) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | I | II | I | II | I | II | I | II |
| 1992 | 26.7 | 30.5 | 18.8 | 21.7 | 1426 | 1364 | 693 | 697 |
| 1993 | 27.4 | 32.3 | 19.4 | 21.7 | 1569 | 1458 | 965 | 195 |
| 1994 | 27.6 | 30.7 | 19.6 | 20.8 | 1533 | 1360 | 628 | 565 |
| 1995 | 28.4 | 31.3 | 19.9 | 22.0 | 1402 | 1317 | 279 | 62 |
| 1996 | 27.4 | 31.1 | 18.1 | 22.6 | 1496 | 1296 | 803 | 153 |
| 1997 | 28.6 | 31.0 | 20.1 | 21.5 | 1441 | 1233 | 991 | 437 |
| 1998 | 27.7 | 32.5 | 19.6 | 23.0 | 1290 | 1370 | 1346 | 560 |
| 1999 | 29.2 | 32.8 | 20.6 | 22.1 | 1398 | 1329 | 549 | 388 |
| C.V | 2.9 | 7.4 | 4.0 | 8.2 | 6.1 | 12.9 | 41.4 | 156.4 |

[z] GDD, growing degree days (℃).

氣候變遷是氣候全面改變，並不單只是$CO_2$濃度或溫度的改變，每一種氣象因素對產量的形成都有特定作用，調整氣象因子對產量的影響力，即是敏感度分析。透過氣象敏感度分析可了解不同氣象因素在未來氣候變遷所扮演角色。本研究中所使用產量資料，以台農67號一期作爲例，8年產量資料以1993年產量最高，1995年最低，另外1998年累積雨量高達1346公厘，同時日射量也最低，因此選定1993、1995及1998等三年的氣象資料進行DSSAT敏感度分析。圖3爲三個年度增溫及增加$CO_2$濃度後產量的變化，增溫使生育日數縮短，水稻在營養生長及生殖生長皆可能因發育或充實不足而減產。依據圖中資料，在增溫5℃時約減產20-25％，但$CO_2$濃度的提高則有助於產量增加，二倍$CO_2$時(660 ppm)，1993年增產至12114公斤／公頃，約增加21％，對低產的年度1995年而言，增加幅度更多，爲27.4％。若以1998年氣象條件爲基礎，提高溫度及$CO_2$濃度作組合，則不同組合下的水稻產量

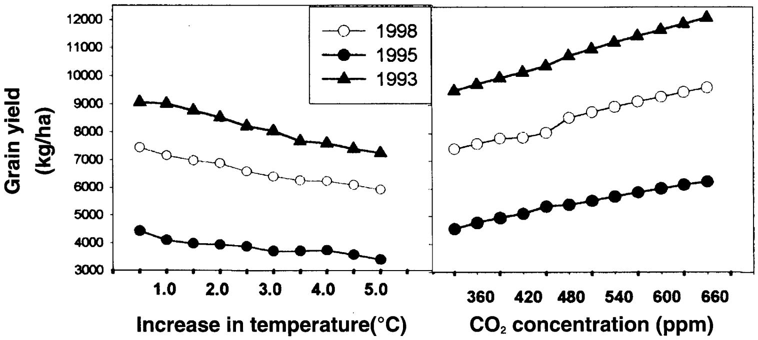
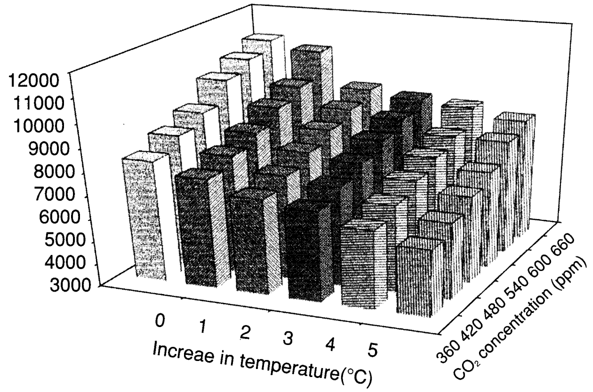



圖3. 利用DSSAT模式模擬提高溫度及二氧化碳濃度對水稻穀粒產量之敏感度分析。

**Fig. 3** The sensitivity analysis for the grain yield of rice under the increase of temperature and $CO_2$ concentration by DSSAT model simulation.



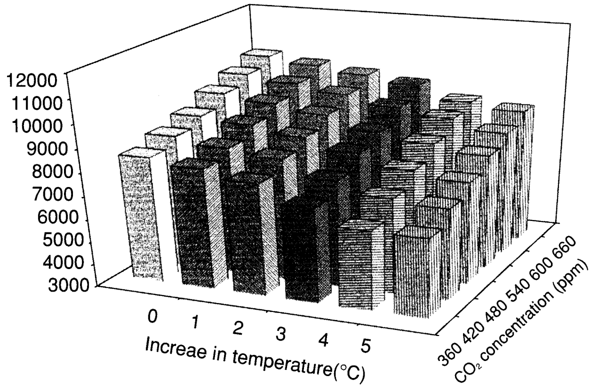




圖4. 水稻一、二期作為提高溫度及二氧化碳濃度後水稻穀粒產量之敏感度分析。

**Fig. 4** The sensitivity analysis for the grain yield of rice under the increase of temperature and $CO_2$ concentration in first and second cropping seasons.

預測如圖4。一、二期作的結果大致是相近，提高溫度使產量減少，增加$CO_2$濃度則產量增加，不過，在二倍$CO_2$濃度(660ppm)下，不同增溫程度的產量仍較目前產量爲高，顯然若從溫度及$CO_2$濃度兩項因子考慮，未來氣候變遷對我國水稻生產是呈增產的趨勢。

根據IPCC (1995)報告指出，全球平均溫度在二十世紀 (1901-1994) 上升0.5℃，姚等人 (1999) 針對我國十個氣象站過去45年，除恆春測站增溫不顯著外，其餘各站皆呈暖化現象，以台中爲例，約上昇0.4℃，至於未來是否如預測結果會急速增溫？則有不同的看法，甚至質疑全球是否暖化[24]。造成南轅北轍的結果主要在"雲"，Ramanathan等人 (1989) 利用衛星影像探討雲及輻射收支平衡發現，暖化是因雲粒子吸收長波輻射，冷卻則因將短波輻射反射回太空中所致。但是雲的形成、雲量多寡及雲層高度，雖然目前有氣象衛星仍然無法加以量化，同時雲的數值處理也是氣候模式最棘手問題[16]。雲依據位置、厚度及含水量對溫度具有正反迴饋機制。此外，大氣及地表水氣或水氣含量也影響雲的形成及變化等，雲更直接影響降雨量及光照強度，因此就GCM的輸出值對於地域性較強之降雨或光照強度預測度偏低。

影響水稻產量的氣象因素，根據以往作物產量模式研究及氣象災害統計而言，光照強度和降雨量是影響水稻生產的主要氣象因素[5, 2]。圖5爲光照強度及降雨量之氣候敏感度分析，兩種氣象因素以倍數方式表示，1爲目前觀測值，光照強度由0.7至1.3倍，雨量則由0.2至5倍，由不同增減倍數進行敏感度分析。以1998年爲例，光照強度增加30％，產量增加20％，增加幅度較$CO_2$濃度加倍所導致增產相近。1995年二期作之輻射量爲1402 MJ/m$^2$，介於1993及1998年之間，但隨光照強度增加反而有減產現象，顯然光照強度的增加若沒有其他氣象因素相互配合，則反而引起其他逆境，由於1995年一期作雨量僅279公厘，爲8年內少雨的年份，若將雨量增加3倍，則產量便隨光照強度增加而增加(資料未顯示)。

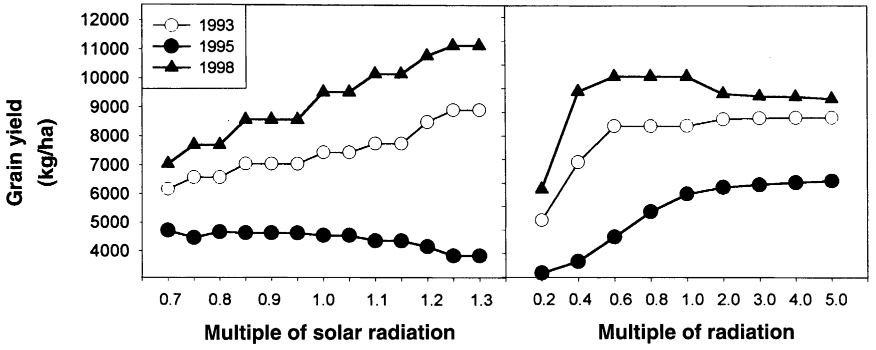



**圖5.** 利用DSSAT模式模擬不同倍數之太陽輻射量及雨量對水稻穀粒產量之敏感度分析。

**Fig. 5** The sensitivity analysis for the grain yield of rice with different multiple of solar radiation and rainfall by DSSAT model simulation.

雨量由於CV值極大，因此所選擇的倍數也較大，由0.2至5.0倍，由三個年度的一期作敏感度分析結果可發現，雨量至某一定值後則再多的雨量也不影響產量，1993及1998年在0.6倍時即達穩定，1995年則在3倍時達到，將當年實際降雨量乘以該倍數，則雨量在600-800公厘間，雨量即不會成爲產量形成的限制因子（圖5）。作物模式本身除預測正常天氣狀況之產量外，也應包括對於作物生長過程中所遭遇之逆境模擬與評估。在我國稻作生產之氣象災害以雨害（有時和強風共同爲害）最爲嚴重，雨害造成生長受阻、葉片光合作用下降、花粉活力喪失、倒伏及產量減少[4]。本研究模擬降雨僅以天然

降雨作爲水稻生產的唯一水份來源，主要探討雨害所造成生長的影響，而非僅以稻田水份供給爲研究目的，因我國水利設施相當便利，除一期作插秧期會遭遇缺水外，其他生育期及二期作水稻田用水以灌溉爲主，若遇梅雨或颱風所帶來雨量較少時，則以休耕方式因應，因此就已種植之水稻而言，探討缺水較無意義。但另一方面，一期作生育後期及二期作常遭遇降雨害的問題，尤其是颱風所帶來豐沛雨量，同時配合強風對稻桿折斷或成熟期倒伏皆會使產量大幅減少。由DSSAT將1993及1998年雨量提高5倍對產量卻無影響，若以實際雨量乘以5倍即高達5000公厘的降雨量，如此雨量水稻恐怕無法存活，因此，DSSAT對於多雨的逆境並未加以考慮。模式中生理參數是由試驗結果統計分析而來，作物在生育過程中遭過的逆境甚多，若沒有更廣泛的生理研究，對較爲極端氣候環境的產量預測能力降低。

氣候研究和生物研究最大不同點在於無重複性，在某一點所測的資料不會有所謂"再現性"，因再重複測試時，測定環境及時間皆改變，某一測值僅代表觀測當時的情景。因此，氣候的研究常借助"模式"的建立及分析，以達到對氣候災變或現象的瞭解。依不同研究領域分別有多種模式的建立，例如颱風預測模式、污染物擴散模式或邊界層模式等。表4爲靠近台中地區網格的GCM模式輸出值，在二倍$CO_2$濃度下一、二期作生育時期及全年之預測值。二倍$CO_2$濃度時氣溫將增加2-4℃，三種模式相差將近1℃；雨量方面除GFDL模式預測一期作有些微下降外，其餘皆是增加情形，增加量約爲20％；太陽輻射量則較爲一致，增加1-8％間。

**表4.** 大氣環流模式所預測氣候變遷情景下水稻期作之氣溫、降雨量及太陽輻射量預測值

**Table 4.** Average seasonal changes in temperature, precipitation and solar radiation under the global climate model (GCM) climate change scenarios

| | Temperature change | | | Precipitation change | | | Solar radiation change | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1st crop[Z] | 2nd crop | annual | 1st crop | 2nd crop | annual | 1st crop | 2nd crop | annual |
| | ----------℃------------- | | | -------multiple------- | | | -------multiple------- | | |
| GISS[Y] | 3.83 | 3.59 | 3.50 | 1.20 | 1.17 | 1.12 | 1.03 | 1.03 | 1.03 |
| GFDL | 3.03 | 2.67 | 2.93 | 0.99 | 1.18 | 1.06 | 1.08 | 1.08 | 1.07 |
| UKMO | 2.78 | 2.69 | 2.70 | 1.36 | 1.20 | 1.14 | 1.03 | 1.01 | 1.03 |

[Z]1st crop=March, April, May and June; 2nd crop = August, September, October and November.

[Y]GISS; Goddard institute for space studies; GFDL, Geophysical fluid dynamics laboratory, UKMO; United Kingdom meteorological office.

目前對於氣候變遷衝擊的評估仍處於試驗階段[30]，除了氣候本身的不確定性外，在時間和空間上的差異仍有許多問題尚未解決，易言之，人類對氣候改變的規律仍不十分清楚，因此在評估上則顯得異常困難，所以IPCC在作任何預測或下結論時皆十分謹慎。"氣候"一詞根據國際氣象組織 (world meteorology organization, WMO) 的定義是至少30年以上之氣象平均值，氣候預測較穩定。作物模式適用性評估需有實測資料作爲驗證，本研究利用農業試驗所八年田間資料作分析，以預測未來氣候變遷下該地區水稻產量，就資料量而論略顯不足，但要在同一塊土地且相同田間管理收集30年產量資料並不容易，過去有所謂全國性"水稻豐歉試驗"，不過隨人員及組織更替，資料並不完整。雖然在資料上有所不足，但本研究主要強調在氣候變遷評估程序及方法利用上。圖6是兩種遺傳特性及期作環境在未來兩倍$CO_2$下台中地區水稻產量預測值，以1992-1999八年的平均產量當作基準值，就秈稉稻的遺傳特性而論，除稉稻台農67號在二期作GISS預測有些爲下降 (-1.5％) 外，兩品種的反應大致是相同，產量皆呈略爲增加趨勢，尤其一期作增加較明顯，大約5-7％，二期作3％。一期作增加幅度較大

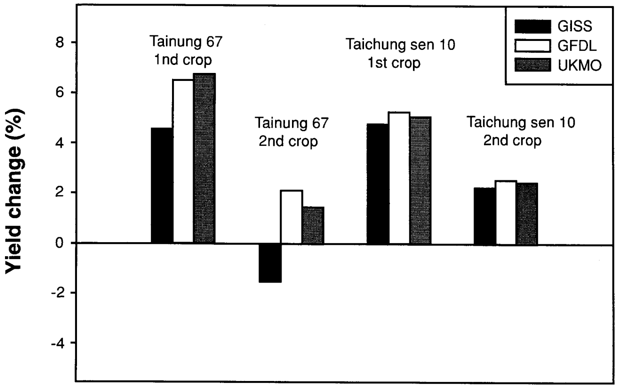



圖6. 利用DSSAT模式模擬不同倍數之太陽輻射量及雨量對水稻穀粒產量之敏感度分析。

**Fig. 6** Simulated changes in rice yield under model of Goddard institute for space studies(GISS), Geophysical fluid dynamics laboratory(GFDL), and United Kingdom meteorological office (UKMO) climate change. Yield changes are expressed as percentage of change from yields simulated under base climate and current agricultural practices.

原因，可能是增溫結果減少水稻苗期低溫的生長障礙。綜合期作及品種的結果，未來在二倍$CO_2$時台中地區水稻產量的預測值，GISS為+2.5 %，GFDL為4.2 %，UKMO為4.0 %。

## 結　論

當前農業研究方向應以解決本土所發生農業問題及提出因應對策為要務，並且能以簡單明瞭數值化方式表達給農民或決策者瞭解。模式可綜合各方面研究成果，對各種氣候變遷衝擊提供確切數據(尤其是產量)，以利於因應對策擬定。作物模式依據模式架構可概略分為簡易 (simple) 或機制性(mechanism)兩種。簡易模式優點是容易理解、輸入值少及容易使用等，但常受限於對環境因素回饋作用的解析能力低，也限制品種遺傳性及生理變化的反應能力，無法提供機率訊息作為評估風險(risk)，因此在探討氣候變化為主的議題上常顯不足；本研究所使用DSSAT屬機制性模式，較能探討基因型和環境的交感，包括因素間迴饋控制，和控制栽培管理環境的變數。但對水稻產量的預測值和田間實測值的決定係數不高，約為0.6-0.7間，主要是此類模式需輸入較多資料，有些輸入值在田間很難取得資料，僅能由預設值去取代所缺之訊息，這常會降低預測能力。因此對於產量影響較大之參數，應有更多的田間實測值當作輸入值，同時一些生理逆境（如降水害）需有更精細的試驗數據，才能提高模式對於逆境的預測能力。

一般而言，氣候變遷預測是以達到二倍$CO_2$時之氣候做評估，依據估算約至2050年才會達到，面對50年後並且是非常複雜的問題，若要求預測的準確度並不切實際，應探討氣候對農作物生產影響趨勢“trend”較為可信。台中地區水稻生產依據研究結果應呈小幅增產趨勢。

## 誌　謝

本研究承行政院農業委員會經費補助（88科技-1.1-糧-13）特申謝忱。

## 引用文獻

1. 孔震成。1989。長期氣象預測在作物產量預測之應用。台灣地區農業氣象資源研討會專輯。201-215。

2. 李蒼郎。1990。氣象因子對水稻產量構成因素之影響及產量估計模式。國立中興大學農藝所碩士論文。
3. 姚銘輝、盧虎生、朱鈞。1999。台灣地區日溫差之分析。中華農學會報。188: 32-46。
4. 姚銘輝、盧虎生、朱鈞。1999。作物遭受降雨之生理反應。科學農業。47: 97-100。
5. 郭文鑠、曾文柄、楊之遠、鄭淑賢。1980。台灣地區氣象因子與水稻產量預測模式之初步研究。氣象學報。26: 71-79。
6. Baker, J.T., L.H. Allen, and K.J. Boote. 1995. Potential climate change effects on rice : carbon dioxide and temperature. pp 31-50. *In* Rosenzweig, C., L.H. Allen, S.E. Hollinger and J.W. Jones. Climate Change and Agriculture: Analysis of Potential International Impact. American Society of Agronomy. ASA special publication No.59. Madison. WI.
7. Bryant, J., G. Taylor, and M. Frehner. 1998. Photosynthetic acclimation to elevated $CO_2$ is modified by source:sink balance in three component species of chalk grassland swards grown in a free air carbon dioxide enrichment (FACE) experiment. Plant, Cell & Environ. 21: 159-168.
8. Chipanshi, A.C., E.A. Ripley, and R.G. Lawford. 1999. Large-scale simulation of wheat yields in a semi-arid environment using a crop-growth model. Agric. Sys. 59: 57-66.
9. Drake, B.G. and M.A. Gonzalez-Meler. 1997. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric $CO_2$? Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 48: 609-639.
10. Hansen, J., I. Fung, A. Lacis, S. Lebedeff, D. Rind, R. Ruedy, G. Russell, and P. Stone. 1988. Global climate changes as forecast by the GISS 3-D model. J. Geophys. Res. 98: 9341-9364.
11. Hunt, L.A., S. Pararajasingham, J.W. Jones, G. Hoogenboom, D.T. Imamura, and R.M. Ogoshi. 1993. GENCALC-Software to faciliate use of crop model for analyzing field experiment. Agron. J. 85: 1090-1094.
12. International Panel on Climate Change (IPCC). 1995. Climate Change 1995. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 572pp.
13. Jansen, D.M. 1990. Potential rice yields in future weather conditions in different parts of Asia. Neth. J. Agric. Sci. 38: 661-680.
14. King , A.W., W.M. Post, and S.D. Wullschleger. 1997. The potential response of terrestrial carbon storage to changes in climate and atmospheric $CO_2$. Climate Change 35: 199-227.
15. Lee, J.J., D.L. Phillips, and R.F. Dodson. 1996. Sensitivity of the US corn belt to climate change and elevated $CO_2$ II. Soil erosion and organic carbon. Agri. Sys. 52: 503-521.
16. Mahlman, J. D. 1997. Uncertainties in projections of human-caused climate warming. Science 278: 1416-1417.
17. Manabe, S., and R.T. Wetherald. 1987. Large-scale changes in soil wetness induced by an increase in $CO_2$. J. Atoms. Sci. 44: 1211-1235.
18. Matsui, T., K. Omasa, and T. Horie. 1997. High temperature-induced spikelet sterility of japonica rice at flowering in relation to air temperature, humidity and wind velocity conditions. Jpn. J. Crop Sci. 66: 449-455.
19. Matsushima, S., T. Tanaka, and T. Hoshino. 1964. Analysis of yield determining process and its application to yield prediction and culture improvement of lowland rice. IXX Combined effect of air temperature and water temperature at different stages of growth on the grain yield and its components of lowland rice. Proc. Crop Sci. Soc. Jpn. 33: 53-58.
20. Matthews, R.B., M.J. Kropff. T. Horie, and D. Bachelet. 1997. Simulating the impact of climate change on rice production in Asia and evaluating options for adaptation. Agri. Sys. 54: 399-425.
21. Monteith, J.L. 1981. Climatic variation and growth of crop. Q.J.R. Meteorol. Sci. 107: 749-774.
22. Nishiyama, I. 1976. Effects of temperature on the vegetative growth of rice plants. pp. 159-185. *In* Climate and Rice. Int. Rice Res. Inst. Los Banos, Philippines.
23. Pearce, F. 1997. Greenhouse wars. New Scientist 2091: 38-54.
24. Ramanathan, V., R.D. Cess, E.F. Harrison, P. Minnis, B.R. Barkstrom, E. Ahmad, and D. Hartmann. 1989. Cloud radiation forcing and climate: Results from the earth radiation budget experiment. Science 243: 57-63.
25. Rosenzweig, C., J. Phillips, R. Goldberg, J. Carroll, and T. Hodges. 1996. Potential impact of climate change on citrus and potato production in the US. Agri. Sys. 52: 455-479.
26. Rosenzweig, C., M.L. Parry, G. Fischer, and K. Frohberg. 1993. Climate change and world food supply. Research Report No.3. Environmental Change Units, University of Oxford, UK.
27. Rotty, R.M., and G. Marland. 1986. Fossil fuel combustion: Recent amounts, patterns, and trends of $CO_2$. pp.474-490. *In*

Trabalka, J.R. and Reichle, D.E. (ed.) The changing carbon cycle: A global analysis. Springer-Verlag, New York.
28. Sinclair, T.R., and S.L. Rawlins. 1993. Inter-seasonal variation in soybean and maize yield under global environment change. Agron. J. 85: 406-409.
29. Smit, B.D., M.C. Nabb, and J. Smithers. 1996. Agricultural adaptation to climate variation. Climate Change 33: 7-29.
30. Soloman, A.M., and R. Leeman. 1990. Climate change and landscape ecological responses: Issues and analysis. pp.293-316. *In* Landscape Ecological Impact of Climate Change, ed. Boer, M.M. and R.S. de Groot. IOS Press, Amsterdam.
31. Terrell, A.B., and S. Geng. 1995. The effects of climate change on United States rice yield and California wheat yield. pp.183. *In* Climate Change and Agriculture:Analysis of Potential International Impact. eds. ASA Special Publication no. 59.
32. Tolbert, N.E. 1997. The $C_2$ oxidative photosynthetic carbon cycle. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 48: 1-25.
33. Tubiello, F.N., C. Rosenzweig, B.A. Kimball, P.J. Jr. Pinter, G.W. Wall, D.J. Hunsaker, R.L. LaMore, and R.L. Garcia. 1999. Testing CERES-Wheat with free-air carbon dioxide enrichment (FACE) experiment data : $CO_2$ and water interaction. Agron. J. 91: 247-255.
34. Vu, J.C.V., L.H. Allen, JR. K.J. Boote, and G. Bowes. 1997. Effects of elevated $CO_2$ and temperature on photosynthesis and Rubisco in rice and soybean. Plant Cell and Environ. 20: 68-76.
35. Wetherald, R.T., and S. Manbe. 1988. Cloud feedback processes in a general circulation model. J. Atmos. Sci. 45: 1399-1415.
36. Wilson, C.A., and J.F.B. Mitchell. 1987. A doubled $CO_2$ climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean. J. Geophys. Res. 92: 13315- 13343.
37. Yoshida, S., and F.T. Parao. 1976. Climatic influences on yield and yield components of lowland rice in the tropics. pp. 471-494. *In* Climate and Rice. Int. Rice Res. Inst. Los Banos, Philippines.
38. Yoshino, M.M., T. Horie, H. Seino, H. Tsujii, T. Uchijima, and Z. Uchijima. 1988. The effects of climate variations on agriculture in Japan. pp. 725-865. In The impact of climate variation on agriculture. Vol 1:Assessment in cool temperate and cold regions, ed. Parry, M.L., T.R. Carter and N.Y. Konijn. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

# The Applicability of DSSAT Model to Predict the Production of Rice and to Evaluate the Impact of Climate Change[1]

Ming-Hwi Yao[2], Huu-Shen Lur[3], Chun Chu[3] and Jin-Chuan Tsai[2]

## Summary

For agriculture production, climate must be managed both, as a resource to be used wisely on the one hand, and a hazard to be dealt with on the other. Concentration of atmospheric $CO_2$ has increased from about 280 to 350 ppm in the last 200 year and has increased rapidly from 315 to 350 ppm during the past 35 year along with other "greenhouse" trace gases. Increased $CO_2$ concentration can affect plant growth due to directly stimulation of photosynthesis. These physiological responses known as" $CO_2$-fertilization effects" can produce larger and more vigorous plant as well as higher yield of total dry matter. In addition, elevated $CO_2$ can also affect plant growth indirectly through alteration of climatic factors such as temperature and precipitation. For this reason, it is very important to understand the impact of climate change on agriculture. Because rice is one of the most important grain crops in Taiwan, it is important to understand the impact of weather and climate change on rice production. In this study DSSAT(Decision support system for agrotechnology transfer) rice model and GCM (General circulation model) were combined to predict the production of rice and to evaluate of climate change. In addition, the sensitivity analysis simulation was used to demonstrate the effect of change in each weather variable alone on rice yield performance. The result showed an increase in $CO_2$ level could increase yields while an increase in temperature would reduced yields. Rice production in Taichung region was predicted by the DSSAT model to change by +2.5, +4.2 and +4.0% under the GFDL, GISS and UKMO 2*$CO_2$ scenarios, respectively.

**Key words** : Climate change, Greenhouse effect, $CO_2$ fertilization effect, General circulation model.

---

1. Contribution No.2041 from Taiwan Agricultural Research Institute, Council of Agriculture.

2. Respectively, Assistant and Associate Researcher, Department of Agricultural Engineering, TARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.

3.Professor, Department of Agronomy, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, ROC.